Tomada de Água do Reforço de Potência de Venda Nova III

André Ferreira[1] **Cristina Sarmento**[2] **Celso Lima**[3]

RESUMO

O aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova está a ser alvo do segundo reforço de potência e, com a sua conclusão, passará a ter a maior central hidroelétrica em Portugal em termos de potência instalada. As obras iniciaram-se em Abril de 2010 e prevê-se a sua conclusão em Julho de 2015.
No presente artigo aborda-se o dimensionamento estrutural da tomada de água, constituída pelo bocal, torre de manobra e pórtico de apoio ao equipamento de movimentação das comportas. É focado com especial atenção o dimensionamento estrutural do bocal e da torre de manobra, com 24 m de altura e 4 m de raio interior, e sobre a qual estão instalados todos os equipamentos necessários à operação das comportas. Neste ponto destaca-se também um pórtico em betão armado, encastrado no topo da torre, com cerca de 15m de altura e que funciona como apoio da ponte rolante que permitirá a movimentação das comportas.
Dá-se ainda especial relevo a algumas singularidades desta obra, como é o caso da solução encontrada para garantir a estabilidade das grades do bocal em condições extremas devidas a perdas de carga associadas à sua obstrução durante o funcionamento dos grupos em bombagem.

Palavras-chave: Tomada de Água, Reforço de Potência, Venda Nova III.

1. INTRODUÇÃO

O reforço de potência de Venda Nova III será constituído por dois grupos reversíveis com potência total de 746 MW e estima-se que este venha a ter uma produção média bruta de eletricidade de 1038 GWh/ano. Com uma queda de aproximadamente 414m e com um caudal de cerca de 200 m^3/s, a tomada de água deste reforço de potência assume portanto um relevo preeminente face à sua dimensão relativamente às já existentes no nosso país. Poderá dizer-se que, em termos comparativos, a secção da zona da entrada do bocal do segundo reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico de Venda

---

[1] EDP, Departamento de Projetos e Investimentos de Engenharia Civil – Fundações e Estruturas, Porto, Portugal. andre.ferreira@edp.pt
[2] EDP, Departamento de Projetos e Investimentos de Engenharia Civil – Fundações e Estruturas, Porto, Portugal. cristina.sarmento@edp.pt
[3] EDP, Departamento de Projetos e Investimentos de Engenharia Civil – Fundações e Estruturas, Porto, Portugal. celso.lima@edp.pt

Nova é cerca de duas vezes mais larga e mais alta do que a do primeiro reforço de potência deste mesmo aproveitamento (Fig. 1) e que, ao longo dos seus 13.2 m de altura livre no troço inicial, se poderia acomodar facilmente um edifício vulgar de quatro pisos.

Figura 1. 3D ilustrativo das tomadas de água de VNII (à direita) e VNIII (à esquerda).

Figura 2. Secção transversal corrente da torre de manobra.

2. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA

Poderá entender-se a estrutura da tomada de água na sua globalidade como sendo constituída por três elementos: o bocal; a torre de manobra e o pórtico de apoio ao equipamento de movimentação das comportas. Estes são apresentados nos pontos que se seguem.

2.1 Bocal

É no bocal da tomada de água que, perante o funcionamento do aproveitamento em turbina, se dá a entrada da água da albufeira de Venda Nova no circuito hidráulico e onde, ao longo dos seus 23 m de desenvolvimento, acontece uma redução significativa de secção transversal do escoamento. A secção é retangular, com largura livre de 18.5 m na zona da entrada e 5 m na zona junto às comportas, com altura também variável entre os 13.2 m e 8 m livres, na zona da entrada e na zona junto às comportas, respetivamente. Na entrada do bocal existem ainda dois septos verticais que dividem o troço inicial em três vãos, e um septo horizontal, que concede apoio às grades de proteção do circuito e que divide a altura da boca em dois vãos com 6,1 m cada.

2.2 Torre de manobra

Após o troço de secção variável do bocal segue-se um trecho com secção transversal constante, com 5.0 m de largura e 8.0 m de altura, onde se instalam a comporta ensecadeira, do tipo corrediça, e a comporta de segurança, do tipo vagão. As comportas são movimentadas no interior de uma torre em betão armado com 24 m de altura, 8 m de diâmetro interior e 1 m de espessura, (Fig. 2). Na plataforma superior, à cota (703,00), estão instalados os equipamentos de operação e manutenção das comportas, constituídos por um servomotor para movimentação da comporta de segurança e um posto de manobra onde serão instalados os equipamentos de comando. Num patamar inferior, à cota (692,40), existe uma laje intermédia onde se armazenam dispositivos para movimentação das comportas e onde é feita a calagem destas quando necessário. A fundação da torre é conseguida à custa de um maciço com cerca de 1800m^3 de betão que se encontra confinado pelos taludes laterais de rocha, com fundação plana e inclinada de modo contínuo com a soleira do bocal e com o circuito hidráulico. Este maciço de betão confere o encastramento necessário à torre perante solicitações horizontais como o sismo e o vento.

2.3 Pórtico de apoio ao equipamento de movimentação das comportas

A partir da cota (703,00) eleva-se um pórtico em betão armado, encastrado na torre de manobra e constituído por duas paredes de 3,0x0,70 m de secção transversal com 14,9m de altura. Um metro abaixo do topo das paredes existe uma laje com 0,70 m de espessura e 8,0 m de vão livre. Sendo este pórtico o elemento estrutural que confere apoio ao equipamento de movimentação das comportas, implementou-se uma solução que consiste na instalação de uma ponte rolante metálica, de 30ton de capacidade nominal, cujo caminho de rolamento é uma viga metálica, IPE 600, apoiada em duas consolas curtas de betão armado existentes em cada uma das paredes do pórtico. Dado o impacto final desta estrutura e a necessidade de integração da mesma no panorama global da paisagem da albufeira de Venda Nova, o desenvolvimento da solução para instalação e movimentação das comportas envolveu também a participação de técnicos da especialidade de arquitetura.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL

3.1 Modelo numérico tridimensional

Na Fig.3 apresenta-se o modelo tridimensional da tomada de água de Venda Nova III, elaborado no programa de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Profissional 2012* (RSA2012), onde se recorreu a elementos de casca para análise do comportamento conjunto da estrutura do bocal, torre e pórtico.
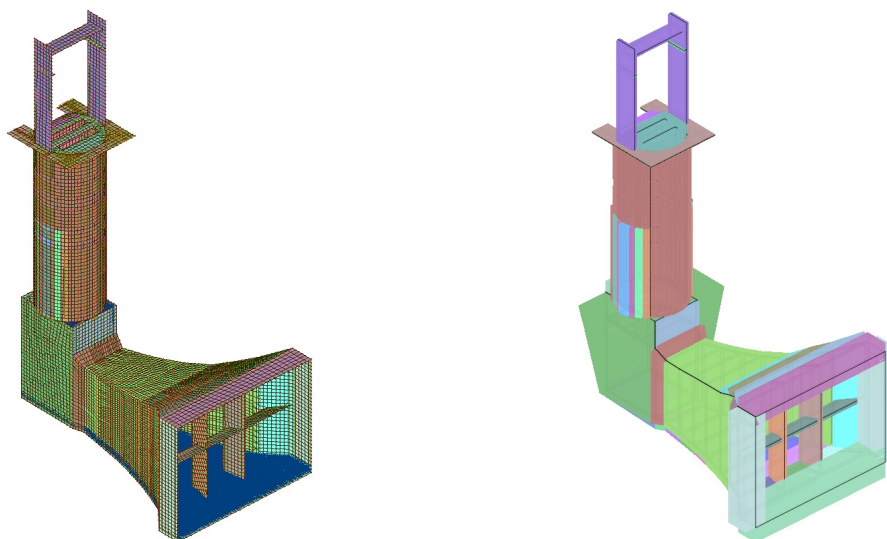
Figura 3. Modelo com elementos de casca da estrutura da tomada de água de VNIII elaborado no RSA2012.

Efetuou-se uma análise não-linear elástica para avaliação dos esforços onde os painéis que simulam a zona de fundação do bocal e da torre foram considerados apoiados em meio elástico, com uma rigidez avaliada a partir do módulo de deformabilidade do maciço rochoso (5GPa) e do coeficiente de Poisson (0,25), valores estes que foram estimados com base nos resultados de estudos geológico-geotécnicos previamente executados.

Adicionalmente a este modelo foram também efetuados modelos mais simples para zonas específicas da estrutura, nomeadamente, para validação das espessuras na zona das ranhuras das comportas e para dimensionamento dos septos, para os quais se elaboraram modelos bidimensionais planos e modelos de barra, respetivamente. Para além da ação da pressão hidrostática exterior para o Nível de Pleno Armazenamento e das ações permanentes associadas ao peso próprio da estrutura e às associadas ao passadiço existente para a ligação da torre à margem esquerda do rio Cávado, foram consideradas as seguintes ações variáveis:

- Sobrecarga nas lajes da torre de manobra com valor de 10kN/m2;
- Sobrecarga na laje de cobertura do bocal com valor de 10kN/m2;
- Ação do vento segundo a NP EN1991-1-4 [1];
- Ação sísmica por meio de espectros de resposta segundo a NP EN1998 [2];
- Diferencial térmico na torre de ΔT=±10 ºC;
- Diferencial de pressão entre montante e jusante das grades frontais do bocal de ΔH=±50 kPa, admitindo o funcionamento do circuito em turbina e em bombagem.

Para evitar que se instale uma pressão hidrostática desequilibrada nas faces da soleira do bocal no caso de um abaixamento rápido da albufeira foram previstos drenos, dispostos em quincôncio com um afastamento de 2 m, na zona a montante da comporta ensecadeira.

3.2 Bocal e Fundação da torre de manobra

O dimensionamento estrutural do bocal da tomada de água foi fortemente condicionado pela combinação relacionada com o caso de carga que corresponde ao diferencial de pressão de 50 kPa nas grades como ação variável base. Este valor foi imposto pelo fornecedor de equipamentos após análise da estabilidade das grades perante possíveis obstruções no escoamento, e implica que a estrutura do bocal fique sujeita a um esforço de tração elevado aquando do funcionamento do circuito em bombagem. Tal facto condicionou o resultado dos diferentes elementos à flexão composta e, aliado às grandes dimensões dos vãos do bocal, teve impacto marcante nas espessuras e na armadura obtida. A Fig.4 apresenta uma planta da zona do bocal da tomada de água enquanto na Fig. 5 pode ver-se o mapa dos assentamentos verticais da laje de fundo, obtidos para a combinação de serviço condicionante em termos de cargas verticais e de acordo com o modelo numérico tridimensional referido do ponto 3.1. As Fig.6 e 7 apresentam, respetivamente, a montagem da armadura da soleira e a betonagem das paredes laterais do bocal da tomada de água.
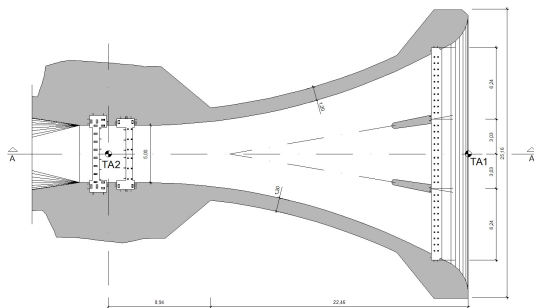
Figura 4. Planta da zona do bocal da tomada de água.
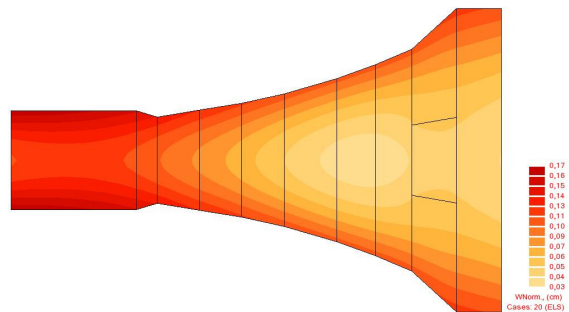
Figura 5. Mapa de assentamentos verticais da laje de fundo para a combinação de serviço condicionante.

Figura 6. Montagem da armadura na soleira.

Figura 7. Betonagem das paredes laterais.

3.3 Os septos e o sistema de fixação das grades do bocal

3.3.1 Metodologia construtiva

A construção de uma tomada de água envolve uma grande interação com equipamentos mecânicos, sejam eles, por exemplo, as comportas ou as grades de proteção. Dada a complexidade de montagem e posicionamento de alguns destes elementos em obra, a betonagem de certas zonas é efetuada em duas fases distintas. Foi o caso das ranhuras das comportas e das grades de proteção do bocal onde o faseamento construtivo passou por construir, em primeira fase, toda a estrutura de betão com exceção das zonas das ranhuras onde se situam os elementos de fixação, que foram betonadas, em segunda fase, após montagem e correto posicionamento de todos os sistemas mecânicos de fixação.

3.3.2 A ação das grades do bocal

As grades do bocal instalam-se nos seis vãos originados pela grelha formada pelos dois septos verticais e pelo septo horizontal. Em cada um dos vãos, as grades funcionam simplesmente apoiadas na direção vertical, transmitindo as ações ao septo horizontal, à soleira e à laje de cobertura. O septo horizontal transmite os esforços para as paredes laterais e para dois septos verticais que, por sua vez, transferem os esforços para as lajes da cobertura e da soleira do bocal.
A avaliação dos esforços para dimensionamento dos septos verticais e do septo horizontal foi efetuada com recurso a modelos simplificados de barra e tendo em consideração as forças provenientes das grades. A Fig.8 ilustra uma vista frontal das grades, apresentando também, em corte longitudinal, os pontos de aplicação das ações e o seu valor característico.
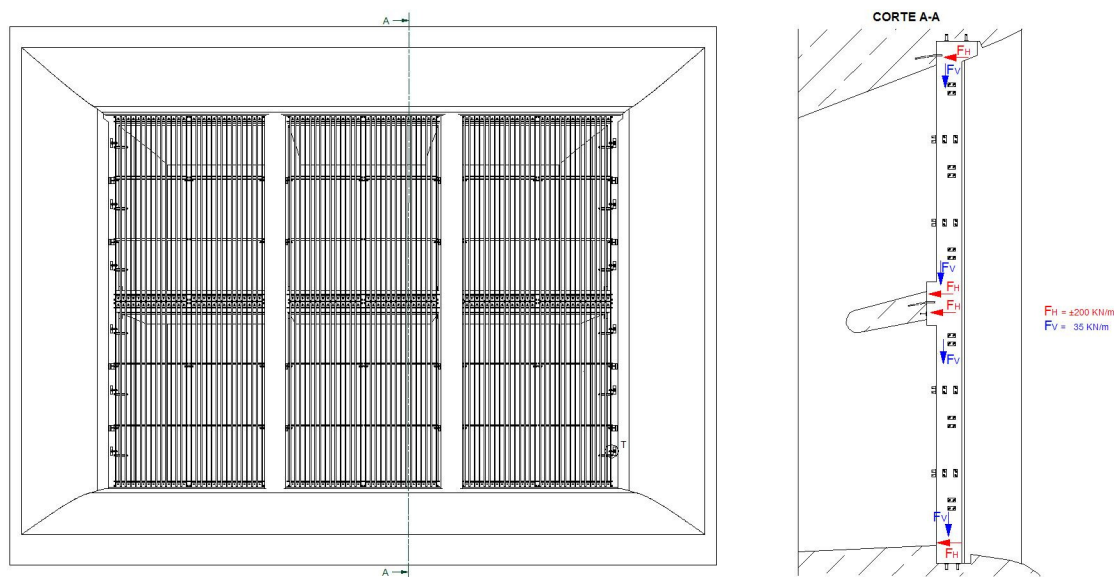
Figura 8. Vista frontal das grades do bocal (à esquerda) e pontos de aplicação das ações das grades (à direita).

Uma grande particularidade deste bocal é, para além das suas dimensões, a necessidade de considerar forças provenientes das grades com igual valor quer para o funcionamento do aproveitamento em turbina quer para o funcionamento em bomba. Tal origina, como se percebe, esforços de tração condicionantes para o dimensionamento da estrutura, implicando também que se idealize um sistema de fixação das grades que permita transmitir, de modo eficaz, as forças de arrancamento de valor elevado.

3.3.3 Sistema de ligação das grades ao betão de primeira fase

A procura de um sistema para fixação das grades que se demonstrasse capaz de garantir a transmissão dos esforços de modo eficaz foi alvo de diversos estudos e de um longo processo de maturação por

parte da equipa de projeto. Porém, apesar de distinta da usual, a solução encontrada foi bastante simples.
O sistema caracteriza-se por deixar betonados, em primeira fase, varões roscados na extremidade e aos quais se conectam, em segunda fase, as peças fixas com recurso a porca e contraporca (Fig. 9). Dados os esforços envolvidos foi necessário dispor pares de varões de 32 mm, afastados de cerca de meio metro ao longo do septo horizontal, e pares de varões de 25 mm na laje de cobertura e na soleira do bocal com igual métrica. As peças fixas são divididas em três módulos, um para cada um dos vãos horizontais, e possuem, em cada um destes módulos, chapas transversais com 2 cm de espessura e com métrica coincidente com a do afastamento dos varões roscados (Fig. 10). O aperto dos varões é efetuado nestas chapas permitindo a transmissão dos esforços das grades do bocal ao betão de primeira fase.
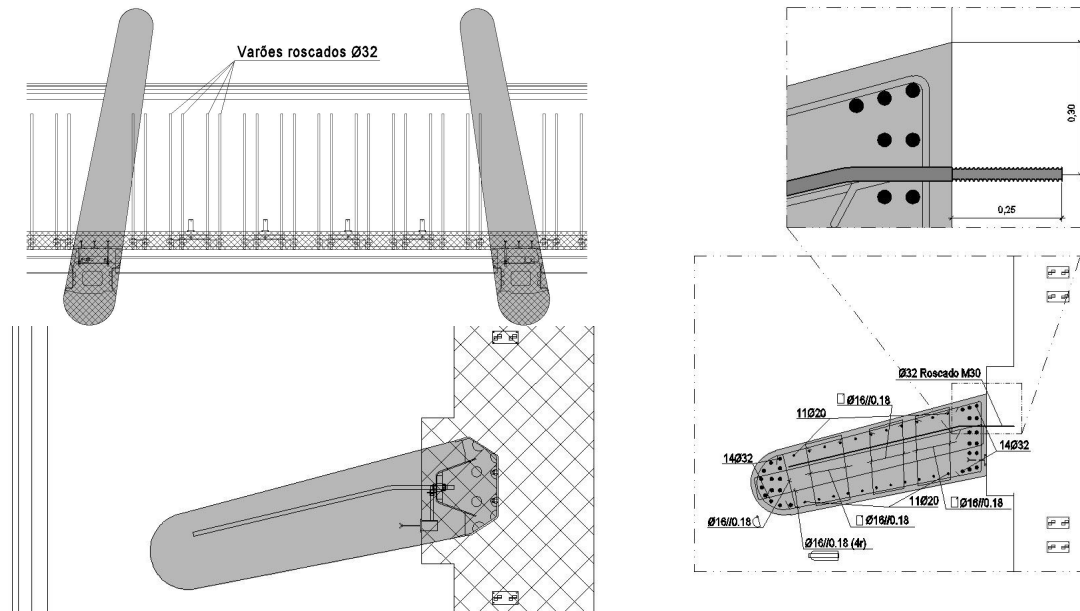
Figura 9 Detalhe do posicionamento dos varões roscados no betão de primeira fase.
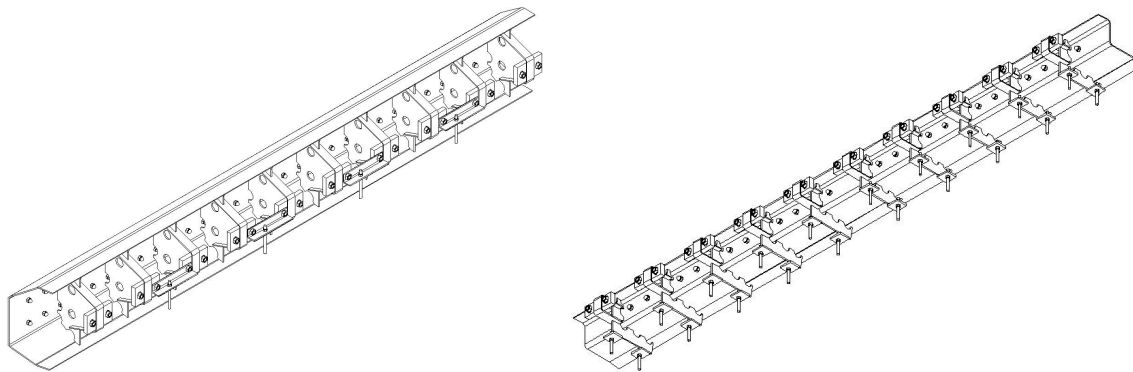
Figura 10 Detalhe do módulo central da peça fixa do septo horizontal (à esquerda) e da soleira (à direita).

Para a avaliação da adequabilidade desta solução importa referir que foram identificadas como principais desvantagens/condicionantes a ter em consideração na decisão as indicadas de seguida:

- Maior robustez da peça fixa;
- Necessidade de detalhe mais rigoroso do posicionamento e da compatibilização das armaduras de segunda fase com todos os elementos da peça fixa.
- Redução de espaço de trabalho na montagem.

A estas zonas está, como se sabe, normalmente associado um espaço de trabalho muito reduzido para dobragem e posicionamento das armaduras de segunda fase. Apesar de tal dificuldade ser comum também noutras soluções, dado o aumento da robustez da peça fixa com a incorporação de chapas relativamente espessas e pouco espaçadas, tornou-se imperativo que a compatibilização de todos os elementos fosse levada a cabo de forma ainda mais cuidadosa na fase de projeto.

3.4 Torre de manobra

3.4.1 Comportamento dinâmico

Para avaliação do comportamento dinâmico da estrutura e para estimativa dos modos de vibração principais considerou-se, no modelo numérico já referido no ponto 3.1, um encastramento perfeito na base da torre. Adicionalmente foi elaborado um modelo de barra, com inércia equivalente ao conjunto torre e pórtico, admitindo também um encastramento na base. Este último modelo permitiu validar os resultados obtidos no modelo tridimensional de casca para o qual a seguir se resumem, em forma de quadro, os resultados obtidos.

Quadro 1. Análise modal da torre de manobra.

Modo	*Frequência*	*Período*	*Fatores de participação modal*			
			Direção X	*Direção Y*	*Acumulado Direção X*	*Acumulado Direção Y*
	[Hz]	[s]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	1,46	0,68	0	6,64	0	6,64
2	3,06	0,33	27,72	0	27,72	6,64
3	5,03	0,2	0,01	48,01	27,73	54,66
4	5,07	0,2	0,03	12	27,76	66,66
5	5,23	0,19	38,51	0	66,27	66,66

Pela análise do Quadro 1 e da Fig.11 pode verificar-se que o primeiro modo de vibração, com frequência de 1,46 Hz, corresponde ao modo de vibração do pórtico da torre na direção de menor inércia das paredes (Y). A torre apresenta um modo principal na direção Y, modo 3, e dois modos principais, modos 2 e 5, obtidos para a direção X, sendo estes coerentes com os obtidos no modelo de barra simplificado. Uma percentagem de participação modal de cerca de 85% da massa do modelo de casca foi atingida apenas para o modo número 40 e com frequência na ordem dos 40 Hz. Verifica-se portanto que os principais modos de vibração mobilizam cerca de 35% da massa global na direção X e cerca 50% na direção Y, tendo os restantes modos uma expressão diminuta no comportamento dinâmico global da torre.
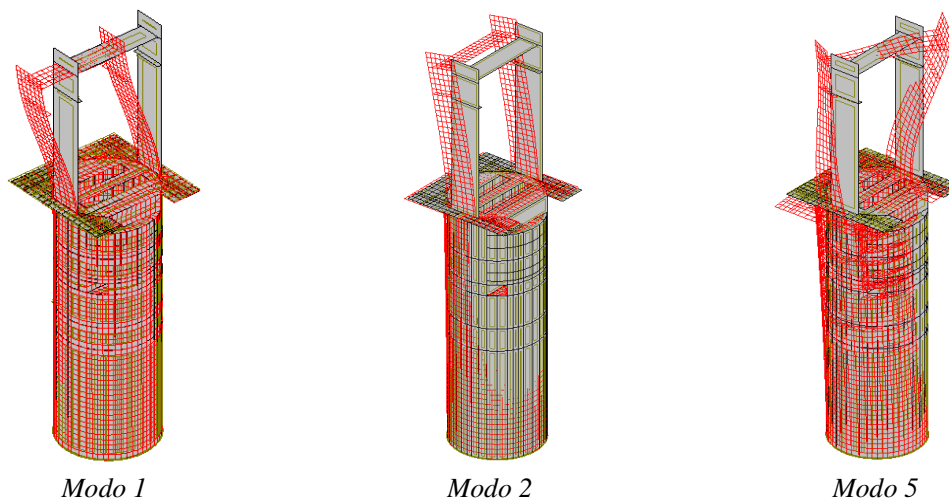
Figura 11 Principais modos de vibração da torre da tomada de água.

3.4.2 Análise Sísmica

A análise sísmica foi efetuada de acordo com a NP EN 1998 [2], avaliando-se os esforços resultantes da ação sísmica a atuar, independentemente e, posteriormente, combinando-se cada direção com 30% dos valores obtidos para a direção perpendicular.

A tomada de água de Venda Nova III encontra-se inserida no município de Montalegre, para o qual se resume no Quadro 2 as acelerações de projeto consideradas nas direções horizontais e vertical. Tomou-se um coeficiente de comportamento igual a 1,5 e uma classe de importância de nível IV, concluindo-se que a ação sísmica não se revelou condicionante no dimensionamento final da torre. A espessura de 1 m foi condicionada pela garantia de encastramento do pórtico à cota (703,00), e manteve-se constante em toda a altura da torre por condições arquitetónicas e construtivas. As armaduras obtidas foram essencialmente reguladas pela ação do gradiente de temperatura interior/exterior de ±10 ºC.

Quadro 2. Acelerações sísmicas de projeto consideradas.

	Sismo Tipo I	*Sismo Tipo II*
a_{gr}(m/s^2)	0,35	0,8
Coef. Importância	1,95	1,5
a_g(m/s^2)	0,683	1,200
a_{gV}(m/s^2)	0,512	1,140

3.5 Maciço de Fundação

A análise e dimensionamento do maciço de fundação foi complementada com recurso a um modelo de casca, bidimensional, com secção transversal ao eixo do circuito hidráulico. Tal permitiu avaliar a trajetória de tensões e estimar os esforços instalados nas zonas junto das ranhuras devido à reação do maciço na lateral perante as cargas verticais. Este elemento funciona como uma cunha confinada pelo maciço rochoso e permite conferir o encastramento necessário para a estabilidade da torre de manobra. A Fig.12 ilustra o modelo descrito bem como a trajetória de tensões normais obtida.
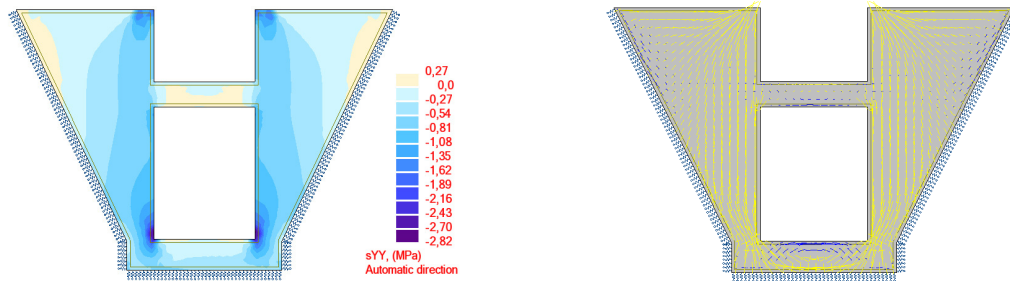
Figura 12 Mapa e trajetória de tensões normais no maciço, à esquerda e à direita, respetivamente.

3.6 Pórtico

Sob o ponto de vista funcional do pórtico de apoio aos equipamentos optou-se por uma solução em betão armado, para a qual se procurou também uma conjugação harmoniosa entre a sua função e integração arquitetónica. Sob o ponto de vista estrutural a ação do vento revelou-se condicionante neste elemento. A avaliação desta ação foi efetuada com base na norma EN 1992-1-4 [1] e considerando os diferentes níveis de enchimento da albufeira. Os efeitos dinâmicos foram tidos em consideração através do fator estrutural, C_sC_d, calculado de acordo com o procedimento 1 sugerido na norma e que, no seu caso condicionante e para esta estrutura, atinge um valor próximo 1,2, ou seja, a ação estática foi agravada em cerca de 20%. As paredes do pórtico têm 0,70m de espessura estando no limite da sua esbeltez na direção de menor inércia das paredes e, para ter em conta a não linearidade geométrica, foi elaborada uma análise P-Δ deste elemento tendo-se estimado um deslocamento horizontal máximo de 1.3 cm. A Fig.13 esquematiza um detalhe das armaduras da consola curta de acordo com a EN NP 1992-1-1 [3] para a zona de ligação das vigas, IPE600, do caminho de

rolamentos da ponte rolante à estrutura de betão e a Fig.14 mostra uma vista geral do pórtico com a ponte rolante.
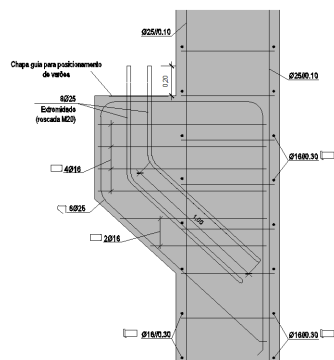
Figura 13 Detalhe de armaduras na zona de ligação dos IPE600 de apoio da ponte rolante à estrutura de betão.

Figura 14 Vista geral do pórtico e da ponte rolante.

4. CONSTRUÇÃO

Na construção foram tomadas as devidas precauções para uma boa execução e desempenho estrutural. Relativamente ao maciço de fundação e dado o volume de betão envolvido (cerca de $1800m^3$) a altura e extensão das camadas de betonagem foram controladas, limitando-se a uma altura máxima de betonagem de 2m. O faseamento de betonagem da torre foi tido em conta limitando a abertura de fendas devido a fenómenos de retração associados à betonagem das aduelas em fases distintas.
Neste ponto são incluídas algumas fotografias da evolução da construção dos elementos estruturais descritos nos pontos anteriores verificada até à data.
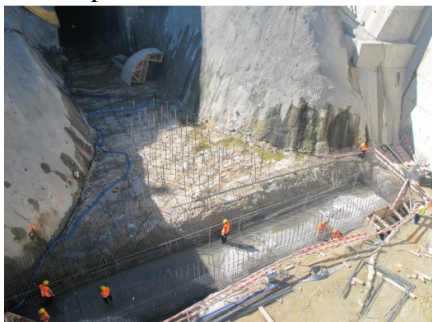
Figura 15 Betonagem da 1ª camada do lábio do bocal.

Figura 16 Armaduras entre as ranhuras das comportas.

Figura 17 Betonagem das paredes do bocal.

Figura 18 Cobertura do bocal e maciço da torre.

Figura 19 Betonagem da torre.

Figura 20 Instalação das peças fixas das grades.

Figura 21 Betonagem do pórtico de apoio à ponte rolante.

Figura 22 Vista geral da Tomada de Água de Venda Nova III.

CONCLUSÕES

A procura de um comportamento estrutural bem definido para a Tomada de Água de Venda Nova III foi conseguida e a solução de fixação encontrada para as grades do bocal não gerou constrangimentos de execução. A execução da obra demonstrou portanto a adequabilidade das soluções de projeto e o resultado obtido é testemunho da simbiose alcançada entre as exigências estruturais, arquitetónicas e funcionais.

REFERÊNCIAS

[1] NP EN 1991-1-4. 2010, Eurocódigo 1 – Projecto de Estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para Edifícios.

[2] NP EN 1992-1-1. 2010, Eurocódigo 2 – Projecto de Estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.

[3] NP EN 1998-1-1. 2009, Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios.

[4] REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho.

[5] RSA - Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes. Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio.

[6] ASCE, 1989– Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments, Volume 2 –Waterways